

1. Uvod

Danas je život nezamisliv bez električne energije. Razvedena je svuda gdje god obitavaju ljudi. I sama pomisao na nestanak električne energije stvara paniku i javlja se instinktivno razmišljanje kako kompenzirati njezin nedostatak. Kada bi struja nestala na samo jedan sat u cijelome svijetu, nastao bi kolaps nezamislivih razmjera. Bolnice sa svim uređajima za održavanje života, javni prijevoz, računala, banke, tvornice, uredi i gotovo sve što možemo zamisliti bi bilo djelomično ili potpuno zaustavljeno.

Da se takvo nešto ne bi dogodilo, postoje razna rješenja koja će osigurati rad električnih uređaja neovisno o nestanku električne energije iz javne mreže. Takve uređaje nazivamo generatorima električne energije. Generatori električne energije se pokreću motorima s unutarnjim izgaranjem, hidroturbinama, vjetrom, plinskim turbinama, poljoprivrednim vozilima itd.

Generatori električne energije ukratko se sastoje od rotora, statora i kućišta u kojem se sve to nalazi. Obzirom da zbog električnih svojstava ili rotor ili stator moraju biti “uvijeni“ za jedan korak utora na statoru, dolazimo do problema proizvodnje statora i rotora. Paketi statora i rotora se prije namatanja bakrenim namotima moraju složiti od lima koji ima zadovoljavajuća električna svojstva. Rotorski i statorski lim se proizvode iz istog komada lima od kojega vanjski dio predstavlja statorski lim koji s unutrašnje strane ima utore u koje se ubacuju bakreni svici, a unutarnji lim predstavlja rotorski lim koji ima određeni broj polova (najmanje dva do preko stotinu) na koje se namataju zavoji od bakrene žice. Paketi rotora i

statora mogu biti različite dužine, čime se utječe na dobivenu snagu generatora.

Najekonomičniji način proizvodnje dinamo-limova je štancanje slijedbenim rezom kojim se za štancanje jednog lima utroši svega nekoliko sekundi. No njegova mana je obavezno zaostajanje srha od štancanja koji za posljedicu ima “nepravilno slaganje limova“. Da odmah razjasnimo, riječ je o stotinkama milimetra koje se prilikom slaganja paketa od dvjestotinjak milimetara (primjerice debljina lima iznosi oko 0,5 mm) zbrajaju te dolazi do tzv. “rasipanja“ paketa rotora ili statora. Posljedica je ta da rotor i stator izgledaju nazubljeno. Nazubljenost rotora i statora može predstavljati problem prilikom namatanja rotora i ubacivanja svitaka u stator, no taj se problem lako rješava postavljanjem električnog izolatora određene debljine koji sprečava tzv. “proboj prema masi“. Posljedica koja se teško može ekonomično kompenzirati u serijskoj proizvodnji je uprešavanje vratila u rotor generatora. Naime, rotor se ne smije moći zavrtiti ili skliznuti s vratila tokom rada stroja. Osiguravanje od smičnog pomaka oko osi vrtnje se vrši steznim spojem uz korištenje pera ili klina, te nazubljivanjem (rovašenjem) vratila. Drugi način je kod generatora snage do cca 135 kVA vrlo zastupljen iz razloga što znatno pojeftinjuje proizvodnju vratila, smanjuje se mogućnost pogreške, te tolerancije više nisu tako stroge kao kada je riječ o glatkom vratilu. Kod kosih rotora je korištenje klina ili pera teško izvedivo jer bi u tom slučaju bilo potrebno svaki rotor strojno obrađivati. Mana rovašenja je ta da dva različita proizvođača takvih vratila mogu proizvesti dimenzijski identične proizvode koji se prilikom uprešavanja ponašaju vrlo različito.

Ali kada se od istog proizvođača dobivaju uvijek ista vratila, uz isti promjer rotora dobivaju se sile uprešavanja s tolerancijom od $\pm 10\%$.

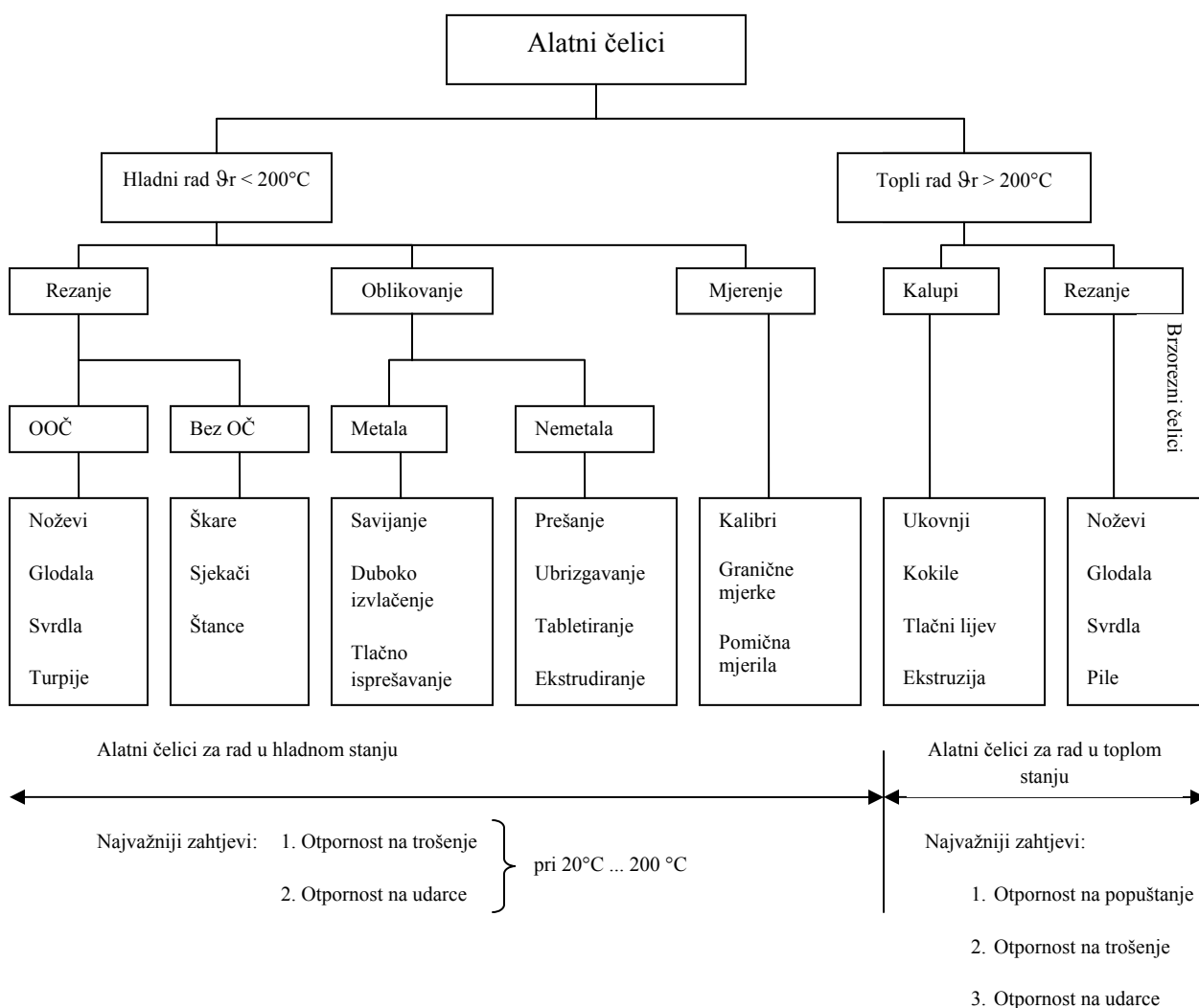
Kako bismo osigurali da nam provrt rotora bude uvijek isti potrebno ga je na neki način očistiti. Osim prije spomenute nazubljenosti provrta rotora, potrebno je i skinuti lak koji se nakupio u provrtu prilikom impregnacije rotora u laku. Praksa je pokazala da za to ne trebaju biti specijalni strojevi vrijedni desetke tisuća eura, nego da se pravilnom konstrukcijom naprave mase oko 2 kg do 10 kg (ovisno o tipu rotora) može postići zavidna postojanost promjera. Naravno za trajnost ovakvog “uređaja” potrebno je odabrati pravi materijal, toplinsku obradu i eventualno obraditi površinu kako bi se osiguralo što manje trošenje alata. Upravo to će biti tema ovoga rada.

2. Čelici za izradu alata za provlačenje

Alatne čelike možemo podijeliti u dvije osnovne skupine:

1. alatni čelici za hladni rad – $\vartheta_r < 200^\circ\text{C}$,
2. alatni čelici za topli rad – $\vartheta_r > 200^\circ\text{C}$.

Podjela alatnih čelika s obzirom na radnu temperaturu i namjenu prikazana je na slici 1.



Slika 1. Podjela alatnih čelika [1]

Dosadašnja iskustva u proizvodnji provlakača u Hrvatskoj su veoma oskudna. U tvornici Sincro d.o.o. koristio se OCR 12 čelik poboljšan (parametri poboljšavanja nepoznati) uz postignutu tvrdoću oko 61 HRC. Taj alat je svoju funkciju vršio oko 5 godina, te je njime provučeno oko 2000 rotora. No zbog svoje konstrukcije koja nije imala vođenje davao je prolazne rupe čije su dimenzije odstupale $\pm 0,02$ mm što je izlazilo iz tražene tolerancije.

Najbitniji zahtjevi za materijal za provlakače rotora jesu:

1. otpornost alata na trošenje,
2. udarna izdržljivost (žilavost i visoka udarna radnja loma).

Što potpunije ispunjenje ova dva navedena svojstva definira kompleksno svojstvo koje nazivamo radni kapacitet alata. No upravo nemogućnost ispunjavanja oba spomenuta zahtjeva istovremeno isključuje mogućnost izbora jednog univerzalnog alatnog čelika.

Kako je riječ o radu u hladnom stanju (brzina rezanja je mala – 5-25 mm/s i ne dolazi do ugrijavanja alata) u obzir dolaze alatni čelici za hladni rad K110 i K390 proizvođača Böhler. Austrija

3. Alatni čelici

Naziv alatni čelici se odnosi na razne vrste ugljičnih i legiranih čelika koji imaju prikladna svojstva da se od njih mogu izrađivati različiti alati. Njihova prikladnost se očituje u njihovoj tvrdoći, otpornosti na abraziju, sposobnosti da se oštrica ne otupljuje i ne deformira na povišenim temperaturama. Alatni čelici se u pravilu koriste u toplinski obrađenom stanju.

Udio ugljika u ovim čelicima iznosi između 0,5 % i 2,1% i oni se toplinski obrađuju u zaštitnim atmosferama kako bi se dobila optimalna svojstva alata.

3.1. Zahtjevi za alatne čelike i tražena svojstva

1. PRIMARNI

- otpornost na trošenje (abrazija, adhezija)
- otpornost na popuštanje – žilavost

2. SEKUNDARNI (proizvodni i ekonomski)

- mogućnost obrade alata – obradivost odvajanjem čestica (reznjivost),
- što viša zakaljivost i prokaljivost,
- što manja sklonost pogrubljenju zrna prilikom austenitiziranja,
- što manja promjena mjera u radu,

- što manje deformiranje u kaljenju,
- sigurnost protiv pojave napuklina i lomova tijekom toplinske obrade,
- što manja sklonost razugljičenju prilikom toplinske obrade,
- mogućnost prebrušavanja u radu,
- prikladnost za poliranje – dovoljna otpornost na koroziju,
- mogućnost nabave i što niža cijena.

3.1.1. Otpornost na trošenje

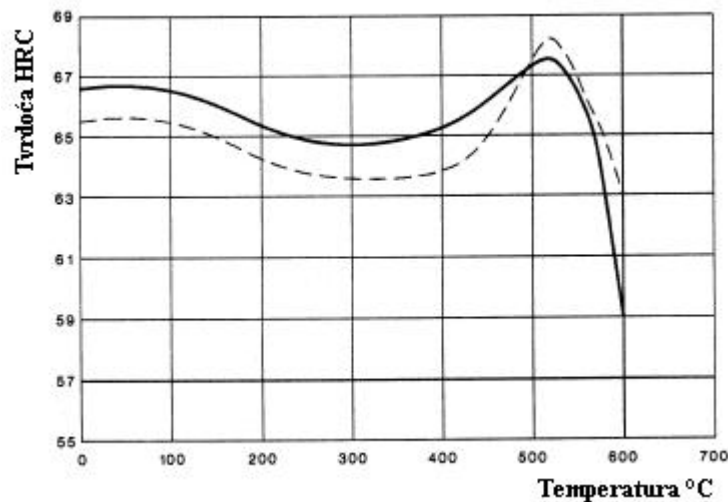
Oko 90 % alata dotrajava zbog trošenja, pretežito abrazijom tj. mikrorezanjem (zatupljivanjem oštrice reznog alata, oštećenje glatkih radnih površina, npr. kalupa, ukovnja i sl.). Otpornost na abrazijsko trošenje alata primarno je funkcija mikrostrukturnog stanja čelika tj. traži se:

- martenzitna mikrostruktura (tvrdoća, vezivo za karbide – nema čupanja)
- što viši udio kvalitetnih karbida (vrsta, veličina, oblik, prostorna razdioba i jaki karbidotvorci Cr, W, V, Mo)
- Nadeutektoidni ili čak podeutektički sastav – u kaljenom stanju $M + K + Az$ ili $M + K'' + K^c + Az$

3.1.2. Otpornost na popuštanje

Otpornost na popuštanje je osobito bitna za alate koji rade pri povišenim temperaturama (kokile, ukovnji) ili za npr. visokootperećene rezne alate. Povišena temperatura uzrokuje veći ili manji pad čvrstoće ili tvrdoće i otpornosti na trošenje, već prema tome o kojoj se vrsti čelika radi. Najveću otpornost na popuštanje pokazuju alatni čelici za topli rad i brzorezni čelici, odnosno, općenito oni čelici koji su legirani barem s jednim od sljedećih elemenata - W, Mo, Co i V.

Na slici 2. prikazan je dijagram popuštanja brzoreznog čelika S390.



Slika 2. Osnovna krivulja popuštanja brzoreznih čelika [3]

3.2. Razredi alatnih čelika

Alatni čelici se rade u nekoliko razreda. Izbor razreda čelika ovisi o tome za što će se alat ili naprava koristiti. Nekad je potrebno zadržavanje oštice alata kao kod štanci ili se traži otpornost na udarno opterećenje kao kod sjekira, batova ili drobilica kamena. Temperatura kojoj je oštrica alata uslijed rada izložena je važna odrednica u određivanju sastava i odgovarajuće toplinske obradbe alata. Obično su čelici s višim udjelom ugljika korišteni za alate za štancanje, rezanje metala i sl.

U tablici 1. navedena je klasifikacija alatnih čelika prema AISI-SAE normi [2].

Tablica 1. AISI – SAE razredi [2]

Vrsta	AISI – SAE razred	Značajna karakteristika
Otvrdnjavanje u vodi	W	
Čelik za hladni rad	O	Kaljenje u ulju
	A	Kaljenje na zraku
	D	Visokouglični; visoki udio Cr
Otpornost na udarce	S	
Brzorezni čelik	T	Na bazi W
	M	Na bazi Mo
Čelik za topli rad	H	H1-H19; na bazi Cr H20-H39; na bazi W H40-H59; na bazi Mo
Čelik za kalupe za injekcijsko prešanje	P	
Čelik za posebne primjene	L	Niskolegirani
	F	Wolframovi karbidi

3.2.1. W razred - otvrdnjavanje u vodi

W razred je dobio ime po načinu zakaljivanja materijala (Water – eng. voda). U W razred spadaju većinom čisti ugljični čelici. Ovi alatni čelici su u najčešćoj primjeni od svih alatnih čelika zbog svoje cijene u usporedbi sa drugim alatnim čelicima. Vrlo su dobri za male dijelove te se primjenjuju u uvjetima gdje se ne pojavljuje previsoka temperatura. Na temperaturama iznad 150°C počinje značajno popuštanje. Prokaljivost im je niska te se zakaljivati mogu isključivo u vodi. Ovaj razred čelika dostiže visoku tvrdoću zakaljivanjem (>60 HRC) i u usporedbi s ostalim alatnim čelicima su krhki. Žilavost im se podiže legiranjem sa Si, Mn i Mo. Također se legira s do 0,20% V radi zadržavanja fine strukture zrna prilikom toplinske obrade.

Obzirom na osnovne karakteristike pojedinog čelika (ovisno o udjelu ugljika) ovi se čelici dogovorno (nenormirana podjela) dijele prema tablici 2.

Tablica 2. Nenormirana podjela nelegiranih alatnih čelika [1]

	%C
Mekane	0,60 ... 0,75
Žilave	0,76 ... 0,90
Žilavo-tvrde	0,91 ... 1,05
Osrednje tvrde	1,06 ... 1,15
Tvrde	1,16 ... 1,30
Vrlo tvrde	1,31 ... 1,50

Zavisno o % C namjena alatnih čelika je:

- 0,6 – 0,75 % C: strojni dijelovi, dlijeta, vretena;
- 0,76 – 0,90 % C: ukovnji, čekići i maljevi
- 0,91 – 1,10 % C: alati koji traže dobar omjer čvrstoće i otpornosti na trošenje (svrdla, škare)
- 1,11 – 1,30 % C: mala svrdla, alati na tokarskim strojevima («amerikaneri») i drugi alati gdje je nužna visoka tvrdoća i dobra čvrstoća

U tablici 3. navedena je podjela ugljičnih alatnih čelika prema DIN-u [1].

Tablica 3. Podjela ugljičnih čelika na kvalitetne skupine prema DIN-u [1]

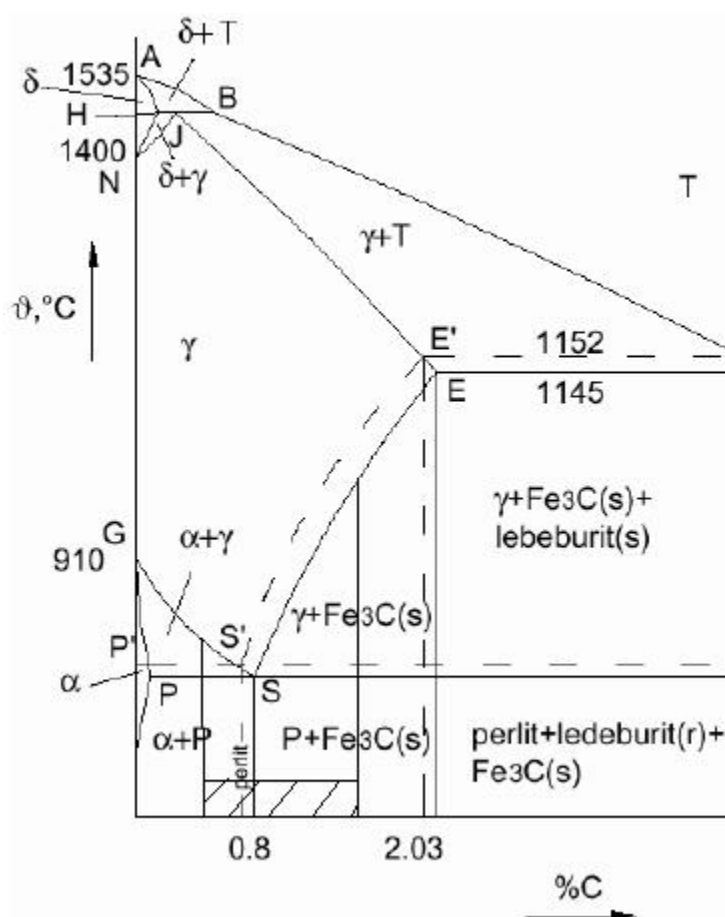
Oznaka kvalitetne skupine	% Si	% Mn	% P max.	% S max.	primjer
W 1	0,1 ... 0,25	0,1 ... 0,3	0,025	0,025	C 100 W 1
W 2	0,1 ... 0,3	0,1 ... 0,35	0,03	0,03	C 125 W 2
W 3	0,15 ... 0,4	0,6 ... 0,8	0,035	0,035	C 60 W 3
W S (za specijalne namjene)	0,25 ... 0,4	0,5 ... 0,7	0,025	0,025	C 85 WS: pile za gatere, kružne pile, tračne pile za drvo, ručne pile C 55 WS: sjekire, nakovnji, čekići, škare, klijesta

- Od kvalitete W 1 prema W3 raste prokaljivost, ali i opasnost od grubog zrna (pri povišenoj temperaturi austenitizacije ili predugom trajanju austenitizacije),

Kod ovih čelika provodi se dezoksidacija aluminijem koji daje okside i nitride koji sprečavaju rast zrna,

Kvalitete W 1 proizvode se samo u elektropeći, a W 2 i W 3 ili u elektropeći ili u SM (Siemens Martinovoj) peći.

Budući da ovi čelici ne sadrže znatnije udjele legirajućih elemenata, njihov udio ugljika im određuje položaj u Fe-Fe₃C dijagramu.



Slika 3. Dijagram Fe Fe₃C s ucrtanim područjem ugljičnih alatnih čelika (šrafirano)

Ovisno o udjelu ugljika, karakter nelegiranih alatnih čelika u žarenom stanju može biti:

- padeutektoidan ($< 0,8 \text{ \% C}$) – feritno-perlitni,
- eutektoidan ($0,8 \text{ \% C}$) – perlitni,
- nadeutektoidan ($> 0,8 \text{ \% C}$) – perlitno-cementitni.

Osnovni element u ovim čelicima je ugljik i on određuje njihova svojstva, no primjese Si, Mn, P, Cr i V modificiraju ta osnovna svojstva.

Njihov utjecaj je:

- Si- služi kao dezoksidant, a na svojstva alatnih čelika utječe ukoliko je njegov udio $> 0,5 \text{ \%}$. Do tog djela silicij malo povišuje otpornost, a malo snizuje žilavost (samo u slučaju ako je visok udio ugljika),
- Mn- dovodi do jačeg prokaljivanja i utječe na pogrubljenje zrna pri povišenim ϑ_a – temperatura austenitizacije i t_a – vrijeme austenitizacije, pa čelici s većim udjelom mangana teže lomu pri gašenju, prvenstveno zato što je mangan snizio M_s – temperaturu početka stvaranja martenzita pri gašenju, te tada čelik više nije sposoban izdržati sve pretvorbene napetosti, pogotovo ukoliko je brzina između M_s i M_f (završetak stvaranja martenzita) velika, a sloj martenzita deblji po presjeku,

V- osnovna zadaća vanadija je spriječiti rast austenitnog zrna jer mu je karbid V_4C_3 vrlo otporan i ne dislocira čak niti pri visokim temperaturama austenitizacije. Zbog toga se ugljični čelici sa vanadijem smiju gasiti i sa onih temperatura gdje bi običnim ugljičnim alatnim čelicima sigurno naraslo zrno. V_4C_3 također predstavlja klice kristalizacije (nedislociran) i snizuje prokaljivost. Također V_4C_3 snizuje ugljik otopljen u austenitu. Ako V_4C_3 dislocira i dođe do otapanja u austenitu, onda se prokaljivost povisuje i austenitno zrno raste. Kombinacija s visokim udjelom V (npr 1% C i 0,5% V) omogućuje da se dio vanadija zadrži kao karbid V_4C_3 i spriječi porast austenitnog zrna, a drugi dio vanadija se rastvori u austenitu i povisi prokaljivost. Tako se navedeni čelik može austenitizirati u vrlo visokom rasponu temperature (od $\vartheta_a=790^\circ\text{C}$ do $\vartheta_a=980^\circ\text{C}$) te gasiti čak i u slanoj vodi bez rizika loma. Primjer tako širokog raspona temperature austenitizacije pomaže da se prokaljenost regulira u vrlo širokom rasponu ovisno o dimenzijama i namjenama alata,

Cr, Ni- tzv. lutajući legirni elementi koji najčešće potječu iz sirovine (staro željezo) mogu slučajno biti prisutni i u većim (neočekivanim količinama) te mogu povisiti prokaljenost, ali i izazvati nejednaku kvalitetu toplinske obradbe (tablica 4.). Tako Cr uglavnom služi za regulaciju prokaljenosti i sprečava nastajanje mekih mjesta uobičajenih kod običnih ugljičnih alatnih čelika.

Tablica 4. Utjecaj lutajućih elemenata u jednom ugljičnom alatnom čeliku na D_i i veličinu austenitnog zrna [1]

S A S T A V %								D_i – idealni kritični promjer	Veličina A zrna pri 815°C
C	Mn	Si	S	P	Cr	V	Ni	mm	ASTM
1,06	0,36	0,27	0,010	0,015	0,05	-	0,02	20	8
1,07	0,36	0,29	0,012	0,012	0,20	-	0,02	21	8
1,04	0,28	0,25	0,017	0,010	0,05	0,17	0,02	18	9

U tablici 5. prikazan je utjecaj legirnih elemenata na svojstva čelika.

Tablica 5. Utjecaj nekih legirajućih elemenata [1, 4]

Le	Utjecaj na prokaljivost	Tip karbida	Glavni utjecaji na svojstva
Si	+	U čeliku ne stvara karbide	Povišenje $R_{p0,2}$
Mn	++	$(Fe, Mn)_3C$	Povišenje otpornosti na trošenje uz visoke %Mn
Cr	+	$Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3	Povišenje otpornosti na trošenje; otpornost na koroziju (uz više od 12 %Cr);
Ni	+	–	Povišenje udarne radnje loma
W	+	Fe_3W_3C , W_6C , WC	Sprečava (usporuje ili odgađa) pad tvrdoće na povišenim temperaturama; povišuje otpornost na trošenje na sobnoj i povišenoj temperaturi
Mo	+++	Mo_2C	Sprečava (usporuje) pad tvrdoće na povišenim temperaturama; povišuje $R_{p0,2}$ na povišenim temperaturama; povišuje otpornost na puzanje na povišenim temperaturama
V	+ ako je otopljen u θ_a – ako je ostao u karbidu	V_4C_3 , VC	Sprečava (usporuje) pad tvrdoće na povišenim temperaturama; sprečava porast austenitnog zrna na previsokoj ϑ_a
Co	–	–	Sprečava pad tvrdoće na povišenim temperaturama i usporuje sve reakcije u strukturi (npr. pri popuštanju)

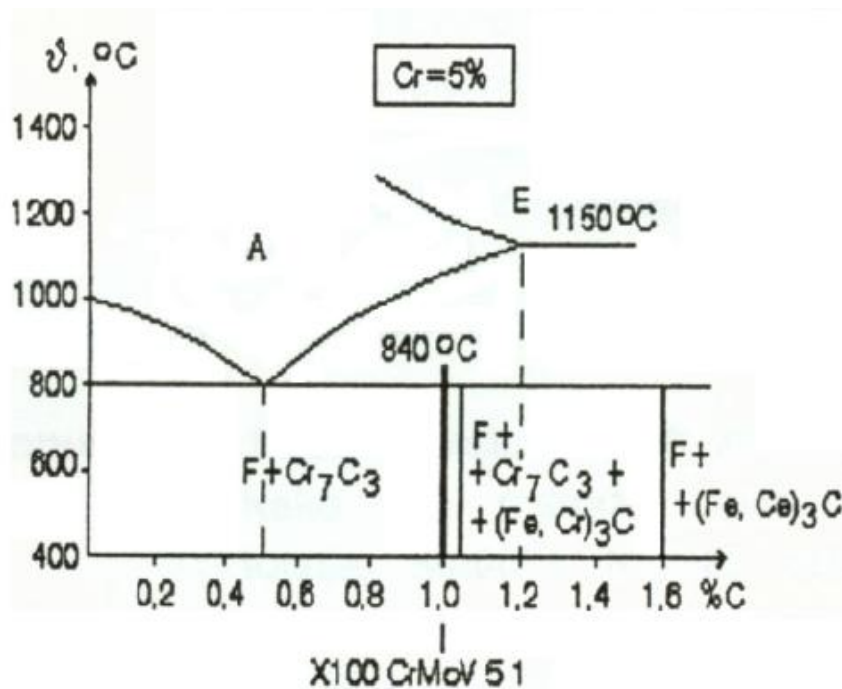
3.2.2. D razred alatnih čelika

D razred alatnih čelika sadrži između 10% i 18% Cr. Ovi čelici zadržavaju tvrdoću do temperatura oko 425°C. Zbog visokog udjela kroma u svome sastavu nekih čelici iz D razreda se smatraju nehrđajućim ili djelomično nehrđajućim alatnim čelicima.

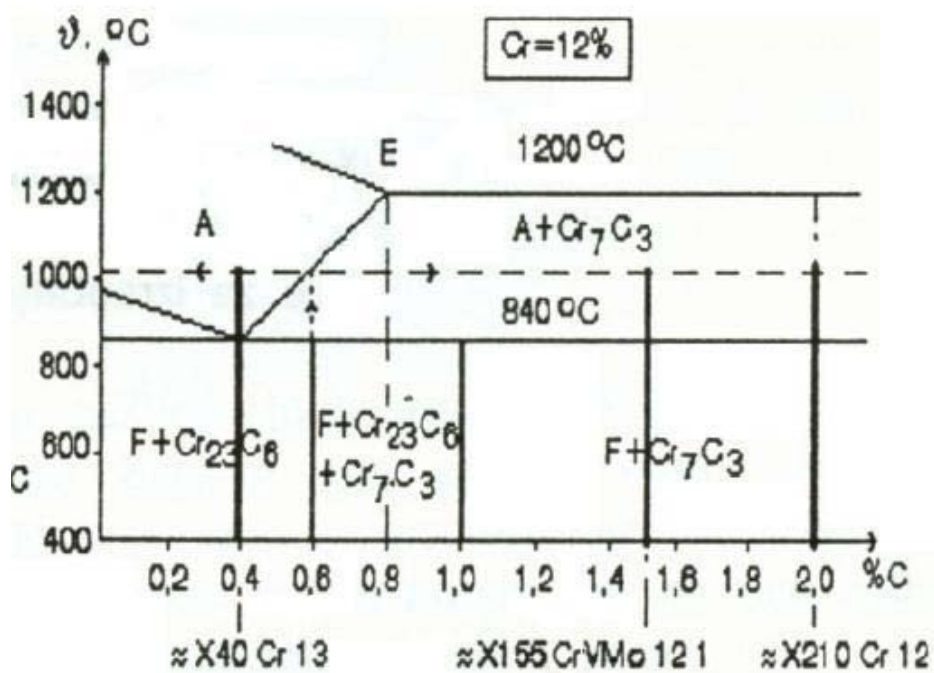
D-2 je tipičan primjer ove vrste čelika koji sadrži oko 1,5 %C, 11-13 %Cr, oko 0,45 %Mn, max 0,030 %P i S, 1% V, 0,7 %Mo i oko 0,30 %Si. Jako je otporan na trošenje ali nije toliko otporan kao čelici koji su manje legirani. Često se koristi za oštrice škara, noževa te za razne industrijske rezne alate.

Kako je krom najutjecajniji element ove grupe čelika, od posebnog značaja će nam biti ternarni sustav Fe-Cr-C, njegovi vertikalni presjeci i njegovi izotermički presjeci.

Na slikama 4. i 5. prikazani su pseudobinarni dijagrami Fe – Cr – C za različite sadržaje Cr.



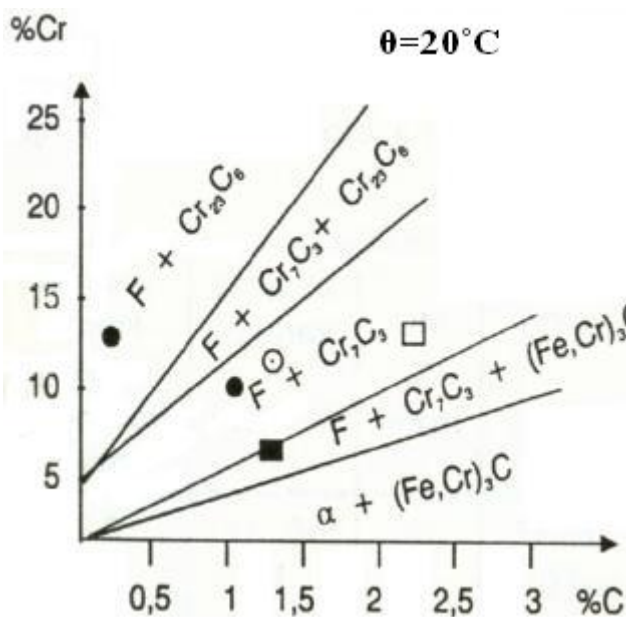
Slika 4. Pojednostavnjeni pseudobinarni dijagram stanja Fe-Cr-C za 5 %Cr [1]



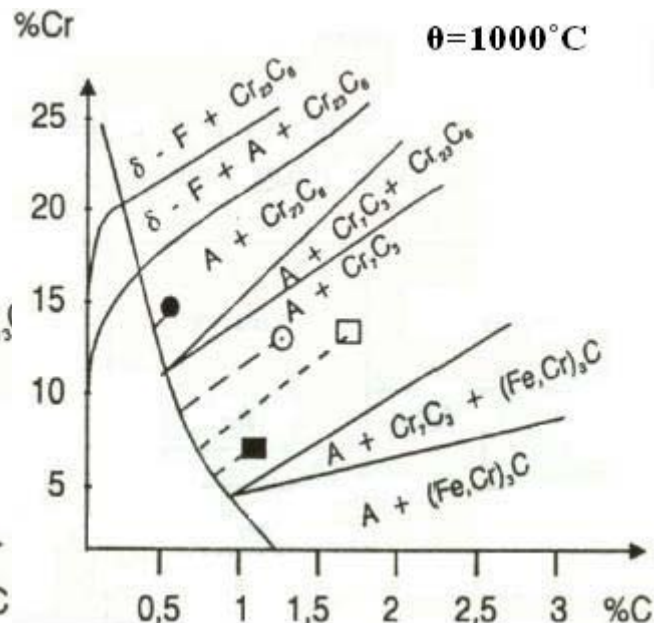
Slika 5. Pojednostavnjeni pseudobinarni dijagram stanja Fe-Cr-C za 12 %Cr [1]

Na slika 6. i 7. prikazani su izotermički presjeci sustava Fe – Cr – C pri 20 °C i pri 1000 °C.

Ovi dijagrami omogućavaju kvalitativne zaključke o strukturnim stanjima čelika sa 5 %Cr odnosno 12 %Cr te procjeni temperatura austenitizacije važnijih čelika iz tog sustava.



Slika 6. Izotermički presjek stava Fe-Cr-C pri 20 °C



Slika 7. Izotermički presjek stava Fe-Cr-C pri 1000 °C [1]

■ X100 CrMoV 5 1 (Č4756)

● X40 Cr 13 (Č4175)

□ X210 Cr 12 (Č4150)

○ X155 CrVMo 12 1 (Č4850)

Iz ovih se dijagrama može procijeniti sastav austenita pri 1000 °C (i martenzita pri 20 °C) i relativni udjel karbida mjerenjem duljina crtkano prikazanih spojnica sastava čelika i austenitne krivulje.

Na osnovi prikazanog zaključuje se o djelovanju kroma:

- legiranje kromom uvodi u čelik karbide ($(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$, Cr_7C_3 s oko 91 %Cr, ili Cr_{23}C_6 s oko 94 %Cr ovisno o udjelu kroma i o udjelu ugljika u čeliku. Udio karbida općenito povisuje otpornost na trošenje,
- legiranje kromom povisuje potrebnu temperaturu austenitizacije u usporedbi sa ugljičnim čelicima sa jednakim udjelom ugljika,
- što čelik ima manje ugljika (uz jednak udio kroma), više će se kroma otopiti u austenitu (i martenzitu) te će čelik biti otporniji na koroziju,
- što čelik sadrži više ugljika (uz jednak udio kroma), to će mu i austenit (martenzit) sadržavati više ugljika te će mu prokaljivost biti bolja.

U tablici 6. prikazani su kvantitativni pokazatelji utjecaja na trošenje visokolegiranih Cr alatnih čelika.

Tablica 6. Kvantitativni pokazatelji različitih utjecaja na otpornost na trošenje visokolegiranih Cr – čelika [1]

Oznaka čelika		Sastav čelika	Tvrdoća HRC	M ₇ C ₃ % mase	MC % mase	Ukupno karbida % mase	Volumen kratera nastalog trošenjem mm ³
VDEh	AISI						
X160 CrMoV 12 1	-	1,6 %C, 12 %Cr, 0,9 %Mo	60	16 ... 17	-	16 ... 17	0,27
			62	17	-	17	0,26
-	A7	2,25 %C, 5,25 %Cr, 1 %Mo, 4,1 %V	60	9 ... 10	7 ... 8	16 ... 18	0,23
			61,5	9 ... 10	7 ... 8	16 ... 18	0,22
-	D7	2,4 %C, 12,5 %Cr, 1 %Mo, 4,1 %V	60	19 ... 20	4 ... 5	23 ... 25	0,12

Iz tablice 5. se jasno uočava utjecaj karbida i količine karbida u strukturi (posebno se vidi kako karbidi MC imaju veći utjecaj od M₇C₃). Također je uočljivo kako tvrdoća bez kvalitetnih karbida ne jamči bitno smanjenje trošenja. Uz kromove karbide M₇C₃ ističu se posebni vanadijevi karbidi MC što se vidi prema ponašanju čelika AISI A7 i D7. Ovi američki i ruski čelici (čelici nisu normirani u Zapadnoj Europi) s oko 4 %V i 5 - 12 %Cr zadržavaju tvrdoću i otpornost na trošenje do radnih temperatura oko 300 °C, čak i kad im se popuštanjem tvrdoća snizi na 58 HRC.

Karbidi srazmjerno njihovoj vrsti i količini podižu otpornost na trošenje nakon kaljenja. Kaljenjem im se smanjuje udio u odnosu na udio u žarenom stanju (za udio eutektoidnih karbida), ali se zato nakon kaljenja nalaze u

čvrstom vezivu – martenzitu. Ovako otopljeni karbidi tek dolaze do punog izražaja.

Ovisno o vrsti i udjelu legirnih elemenata u legiranom čeliku pojavljuju se jedna vrsta ili više različitih vrsta karbida:

- cementit (bifazni karbid), Fe_3C ,
- legirani cementit (polifazni karbid) npr. $(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{C}$ ili $(\text{Fe},\text{Cr})_3\text{C}$. Općenito ih se označava $(\text{Fe},\text{Le})_3\text{C}$ gdje Le simbolizira legirajući metal,
- dvostruki karbid, kao npr. $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$, $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$,
- posebni (specijalni) karbid, kao npr. V_4C_3 , Cr_{23}C_6 , C_7C_3 , Mo_2C , W_6C , WC itd.

Karbidi se u mikrostrukturi čelika pojavljuju:

- u obliku mreže (ljuske) oko metalnog zrna - nepovoljno
- ili u obliku čestica dispergiranih (“raspršenih“) po metalnoj masi (povoljno i to tim više što su čestice karbida sitnije i jednoličnije dispergirane) [4].

Temeljno je svojstvo karbida njihova tvrdoća i njihova krhkost. Krhkost je tim manje izražena ukoliko su čestice karbida sitnije ili je stupanj disperzije karbida viši.

U tablici 7. prikazana je usporeba tvrdoća različitih faza i slojeva [4, 5].

Tablica 7. Primjeri tvrdoća određenih faza, karbida i termokemijskih slojeva [4, 5]

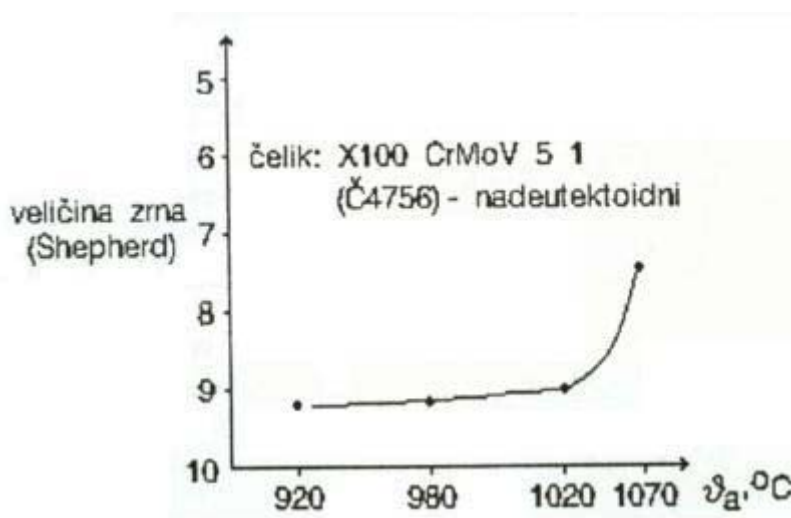
Faza	HV
Ferit	100 ... 250
Perlit	≈210
Martenzit	700 ... 900
Fe ₃ C	≈1000
Cr ₇ C ₃	≈1600
V ₄ C ₃	≈2500
TiC slojevi	3600 ... 4600
Austenit	300 ... 650
Tvrđi krom	800 ... 1300
Slojevi nitrda	700 ... 1500
Slojevi borida	1900 ... 2100
TiN slojevi	2000 ... 2500
WC slojevi	2200 ... 2700
VC slojevi	2300 ... 2700
Dijamant	10000

Posljedica visoke tvrdoće karbida je njihova visoka otpornost na trošenje abrazijom, pa će se čelici s visokim udjelom karbida u kaljenoj strukturi vrlo često primjenjivati za razne vrste alata.

U pogledu otpornosti na trošenje i otpornosti na popuštanje još su efikasniji karbidi popuštanja ($A_z \rightarrow K_p + M''$) no tada je potrebno austenitizirati pri

višim temperaturama kako bi “zaostalo” dovoljno austenita. Povišene temperature austenitizacije kod nadeutektoidnih jednostruko legiranih Cr – čelika izaziva jak rast austenitnog zrna, a samim time i pad duktilnosti nakon kaljenja. U slučaju potrebe kaljenja s viših temperatura, potrebno je izabrati čelike koji sadrže inhibitore rasta austenitnog zrna (V i Mo).

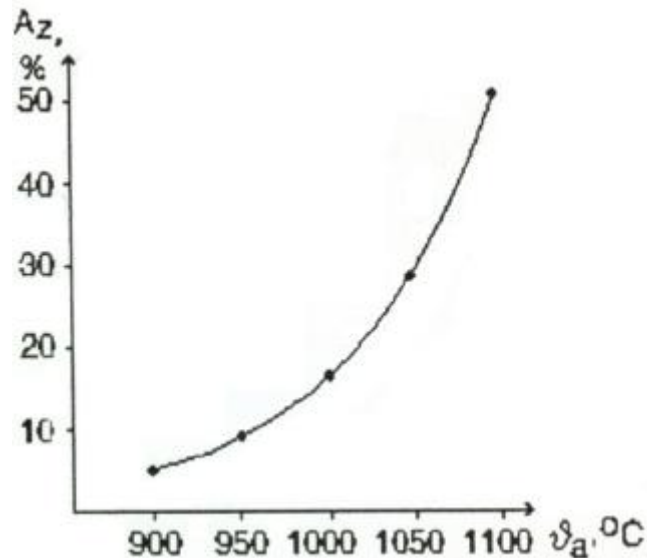
Na slici 8. prikazana je ovisnost veličine austenitnog zrna o temperaturi austenitizacije.



Slika 8. Ovisnost veličine austenitnog zrna o temperaturi austenitizacije [1]

Daljnja karakteristika svih visokolegiranih čelika je zaostali austenit. Zaostalog austenita tim je više čim je temperatura austenitizacije viša, te što je stupanj legiranosti viši. Poznato je da će uz 15 %Az (preostalo je M + K) čelik imati praktički jednak volumen kao što ga je imao prije austenitizacije. Dakle za “bezdeformacijsko” kaljenje visokolegiranih Cr – čelika je potrebno austenitizirati pri temperaturi od oko 1000 °C.

Na slici 9. prikazana je zavisnost udjela zaostalog austenita o temperaturi austenitizacije.



Slika 9. Udjeli zaostalog austenita (A_z) u čeliku X155 CrVMo 12 1 kaljenom s različitim temperatura [1]

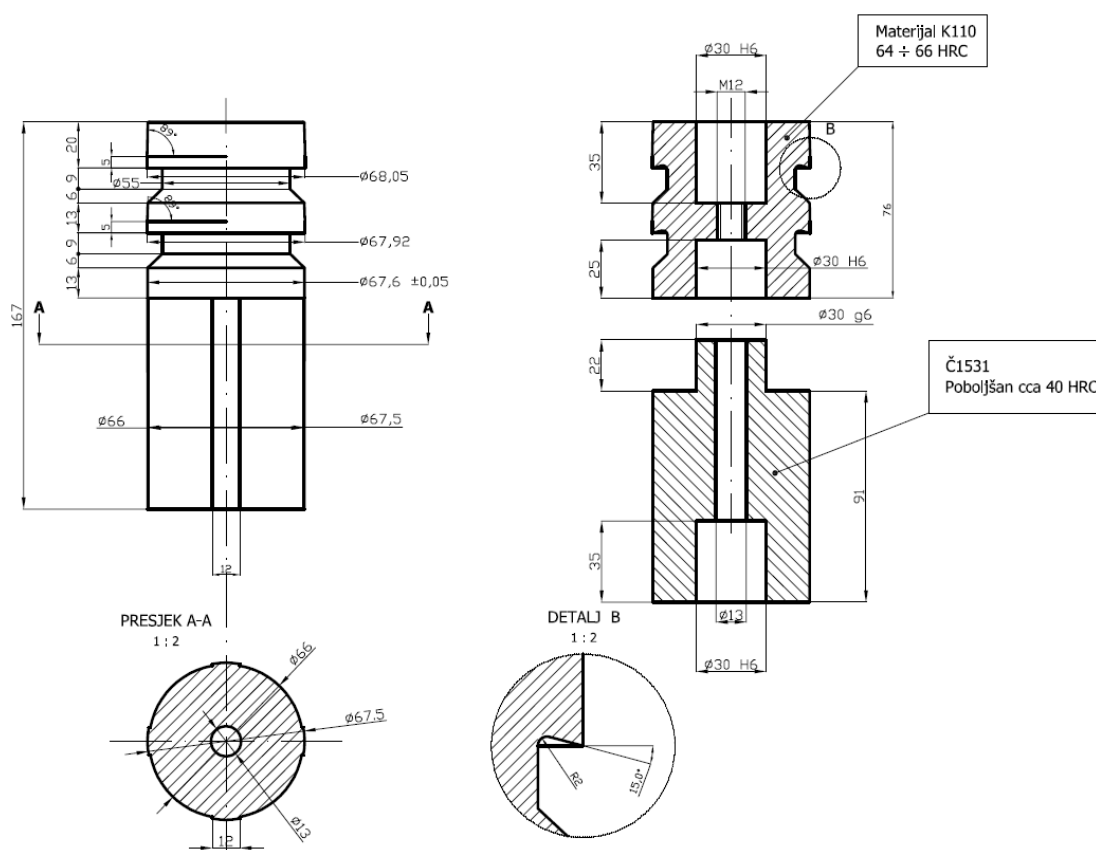
Čelik X155 CrVMo 12 1 može se zahvaljujući djelovanju vanadija austenitizirati pri temperaturama do 1080 °C te će se gašenjem postići i oko 50 % zaostalog austenita koji ukoliko se popušta na temperaturama 520 ... 540 °C, izluči karbide popuštanja i hlađenjem se pretvori u sekundarni martenzit. No tada se gube prednosti “bezdeformacijskog” kaljenja, a postiže viša otpornost na popuštanje te tlačna čvrstoća.

4. Eksperimentalni dio

4.1. Izrada alata za provlačenje rotora generatora

Kao što se vidi iz slike 10. koja prikazuje nacrt alata koji radimo, alat se sastoji od dva dijela. Gornji dio koji sadrži oštrice je opterećen te je izrađen od kvalitetnijeg materijala. Donji dio alata predstavlja vođenje alata. Uloga vođenja alata je dvojaka:

- zadržava alat u poziciji kako ne bi došlo do zakretanja alata prilikom ulaska u rupu koja se provlači,
- sprečava oštećenje oštrice prilikom pada iz rotora.



Slika 10. Nacrt alata za provlačenje rotora generatora 225 snage od 53 kVA do 135 kVA

Prilikom konstruiranja alata se vodilo računa da isto vođenje može biti i s gornje i s donje strane provlakača. Vođenje provlakača nema znatnijih opterećenja izuzev klizanja (labavog) kroz rupu rotora i da podnosi pad u drvenu posudu prilikom ispada iz rotora. Zbog toga se išlo na samo poboljšani materijal koji ima zadovoljavajuću žilavost kako ne bi došlo do loma i malo povišenu tvrdoću, kako materijal na sebi ne bi dobio udubine i oštećenja.

Oštrica alata je dio koje nosi kompletno opterećenje alata. To je razlog zašto je potrebno strogo definirati zahtjeve. Naime, oštrica alata je napravljena u promjeru oko 0,05 mm većem od rupe lima koji se provlači tako da ona, osim laka koji se nakupio u rupi poslije impregnacije, “skida“ i dio metala. Dinamolimovi su obično dosta mekani, no njihova tvrdoća varira od 100 HB pa čak do 165 HB. Dinamolimovi imaju svoje električke zahtjeve koji se mogu dobiti od različitih materijala. Za primjer bismo mogli uzeti uvjet koji glasi 6 W/kg pri induktivitetu 1,5 T. Taj uvjet zadovoljava dosta veliki broj materijala kojima mehanička svojstva prilično variraju. Kako variraju mehanička svojstva obratka tako varira i vijek trajanja alata. No bitno je naglasiti kako izrada samog alata ima zanemarivu cijenu u odnosu na cijenu ispadanja alata iz funkcije. Zaustavljanje proizvodnje povlači cijeli lanac ispadanja, te se javlja prazan hod. Sat tehnološkog vremena u tvornici SKG košta oko 14 €. Korekcije na alatu su dosta ograničeno izvedive u samoj proizvodnji, te je nužno alat nositi na doradu u vanjsku firmu. Dakle ukoliko proizvodnja stane na samo jedan jedini dan, trošak zaustavljanja prelazi cijenu izrade alata koji stoji približno 1000 do 2000 kn – ovisno o materijalu, a što je vidljivo iz ponude tvrtke “CNC obrada metala“, slika 11.

CNC OBRADA METALA

OBRT ZA OBRADU METALA CNC ERODIRANJE vl.Eugen Puž , Bresca 5 , 51213 Jurdani-HR
Tel:091 5080921 , fax 051 279 311, e-mail:eugenalati@net.hr
OIB: 98326049868 , žiro račun:2491005-1141000646 Credo Banka

SKG d.o.o.

BRESCA 1-12-2010

PONUDA ZA IZRADU PROVLAKACA

-cijena provlakača 160 za materijal K110 termički obradjen 64-66 HRC 1080kn+ pdv
-cijena provlakača 225 za materijal K110 termički obradjen 64-66HRC 1140 kn+pdv
-cijena provlakača 160 od matreijala K390 termički obradjen 64-66 HRC 2190 kn+pdv
-cijena provlakača 225 od materijala K390 termički obradjen 64-66 HRC 2340 kn+pdv

Rok izrade -za materijal K110 20 dana od narudzbe
-za materijal K190 10-02-2011

S poštovanjem
Eugen Puž

Slika 11. Ponuda za izradu provlakača

Zato je bitno odabrati najbolji raspoloživi materijal za izradu alata. Najbolji materijal bismo mogli nazvati onaj materijal koji će bez ikakve intervencije moći izvršiti najveći broj ispravnih provlačenja rotora. Naime, svaki provlakač će se provući kroz rupu rotora, no ukoliko on ne očisti rupu na odgovarajući način, postoji velika vjerojatnost da će vratilo zapeti u rotoru. U tom slučaju rotor postaje neupotrebljiv, a nastaje i velika vjerojatnost da niti vratilo više neće biti upotrebljivo. Cijene vrtila variraju od 70 do 200 kn, a cijene rotora od 650 pa do 3500 kn. Iz ovih podataka postaje još jasnije da samo jedna nesukladnost nastala oštećenjem ili otupljenjem provlakača višestruko premašuje cijenu kvalitetnijeg materijala koji višestruko produžuje vijek trajanja alata.

U tablici 8. navedene su jedinične cijene za čelike K110, K390 i S600.

Tablica 8. Cijene nekih vrsta čelika u Böhler Uddeholm

Materijal	Cijena u kn/kg (bez PDV)
K 110	39
K 390	500
S 600 (brzorezni čelik)	90

Također u tablici 12. navedena je usporedba nekih karakterističnih svojstava alatnih čelika za hladni rad.

Vrsta čelika BÖHLER	Otpornost na trošenje abrazijom	Otpornost na trošenje adhezijom	Čvrstoća	Obradivost	Dimenzijska stabilnost po toplinskoj obrad.
K100					
K105					
K107					
K110					
K190 MICROCLEAN					
K245					
K305					
K306					
K329					
K340 ECOSTAR					
K350					
K455					
K460					
K510					
K600					
K605					
K720					
K990					

Slika 12. Usporedba svojstava alatnih čelika za hladni rad [8]

Provlakači u svijetu i nisu toliko nepoznat alat kao što bi se na prvi pogled pomislilo. Kada je riječ o serijskoj ili masovnoj proizvodnji, oni garantiraju najbrži način dobivanja stvarno preciznog provrta ili rupe. Kod provlakača se govori o preciznosti reda veličine $\pm 0,01$ mm, što se može za bolju vizualizaciju preciznosti tolerancije označiti kao $\varnothing 100$ H6, pri čemu se primjerice na CNC stroju gubi i do 20 puta više vremena zbog potrebe za

pozicioniranjem i čišćenjem nakon obrade. Također je jako bitno naglasiti kako je gotovo nemoguće tokariti ili glodati rupe čija je dužina do 700 mm i promjera samo 180 mm (u proizvodnji tvornice generatora SKG). Još je teže zamisliti tokarenje rupe promjera 55 mm i dužine 300 mm i istovremeno imati toliku preciznost i brzinu. Naime, provlakači se u SKG koriste na klasičnim 60 tonskim i 100 tonskim prešama kojima je brzina prešanja podesiva, a za provlačenje najčešće iznosi $10 \div 15$ mm/s. Sile uprešavanja pritom nisu velike (reda veličine oko 1t). Uobičajeno vrijeme provlačenja pritom iznosi od 5 s do 40 s. Zbog tako male brzine rezanja nema velikog zagrijavanja pa se na prvi pogled izbor alatnog čelika za hladni rad čini kao logičan izbor. Na slici 13. prikazana je 100 t preša za uprešavanje vratila u rotore generatora.



Slika 13. 100 t preša koja služi za uprešavanje vratila u rotore generatora

Provlačiti se mogu gotovo svi materijali: metali, plastika, tvrda guma, drvo, kompoziti i dr. Za čelike vrijedi pravilo da što se lakše obrađuje (u pravilu što ima manju tvrdoću) to se lakše i daju provući. Tvrdoća materijala također definira dozvoljeno “nošenje” materijala po zubu. Ovdje nastaje prvi problem definiranja nošenja zuba. Ako je stepenica između dva zuba prevelika, nastat će problem preopterećenja alata. Ako je stepenica između dva zuba premala, tada će doći do “skijanja” alata ili do širenja rupe bez odnošenja materijala.

Kod mekih čelika i materijala kao što su dinamo limovi dozvoljava se veći odrez po zubu. S druge strane minimalni iznos stepenice zuba za mekane čelike je po iskustvu 0,015 mm. Također je bitno obratiti pozornost i na nagib oštrice zuba. Za mekane čelike optimalan kut se nalazi između 15° i 20° , a za tvrde čelike od 8° do 12° . Stražnji kut alata bi se ovisno o tvrdoći materijala i o poziciji noža trebao kretati između $0,5^\circ$ i 3° . Naime, završni nož je poželjno da ima kut blizu $0,5^\circ$ ukoliko se želi dobiti jako fini izgled provučene površine [7]. Time se ujedno smanjuje i trenje između bokova alata i rupe kroz koju se provlači, što smanjuje silu prešanja i općenito smanjuje opterećenje alata.

Konstruirani alat se sastoji od 2 oštrice (vidjeti sliku 10.). Promjer 67,92 je izrađen u tolerancijama 67,92 - 67,94 mm. Završna oštrica 68,05 je izvedena u tolerancijama 68,05 - 68,07 mm. Promjer rupe koju provlakač izvede potpuno odgovara izgledu provlakača te i ona također iznosi 68,05 - 68,07 mm. Također, prednost dobro konstruirane oštrice dolazi do izražaja i time što se pod oštricom ne nakuplja materijal nego optimalnim motanjem ispod oštrice jednostavno ispadne prilikom pada alata. Kod prijašnjih alata

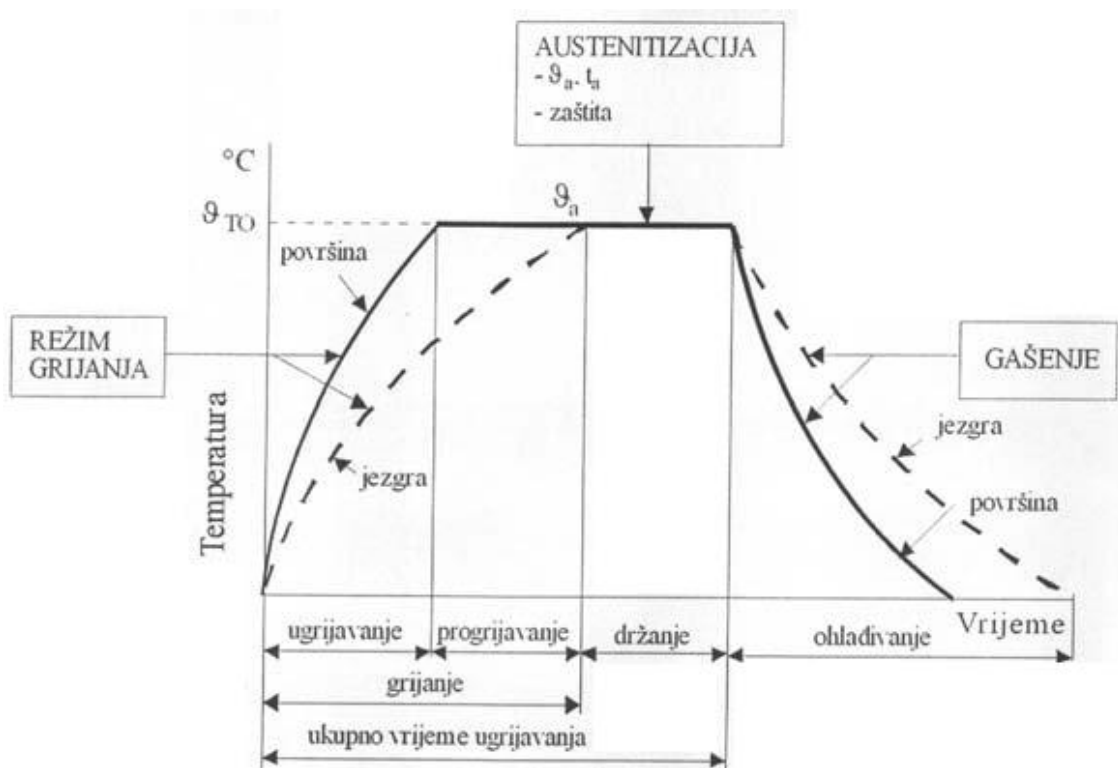
koji su se korsitili u Sincro d.o.o. to nije bio slučaj. Sile uprešavanja alata su male (na 100 tonskoj preši nemjerljive zbog toga što se skala mjernog instrumenta niti ne pomakne iz praznog hoda) unatoč tome što sada alat ima zadatak skidati i metal. Ovo svojstvo možemo pripisati tome što je alat u trenutku pisanja provukao tek oko 150 rotora. Na slici 14. je prikazan provlakač spreman za rad.



Slika 14. Provlakač rotora generatora 225 izrađen od materijala K110 (X 155 CrVMo 12 1)

4.2. Toplinska obrada provlakača

Za svaki alat je od ključne važnosti odabrati odgovarajuću toplinsku obradu. Definicija postupaka toplinske obrade kaže da se toplinska obrada sastoji od niza ugrijavanja i ohlađivanja sa svrhom promjene strukture, a time i svojstava materijala. Opći postupak svakog vida toplinske obradbe može se opisati dijagramom ovisnosti promjene temperature o vremenu (trajanju). Taj dijagram naziva se dijagramom postupka.



Slika 15. Dijagram postupka toplinske obrade

Iz dijagrama postupka toplinske obrade (slika 15.) se vidi kako se ovaj proces može podijeliti u 4 karakteristična vremena:

- **Vrijeme ugrijavanja** (t_{ugr}) je odsječak vremena u kojem će površina predmeta (rub, r) dostići zadanu temperaturu $\vartheta_{\text{peč}}$. U tom trenutku je jezgra najčešće niže temperature od ruba, iznimno jednake u nekim posebnim slučajevima
- **Vrijeme progrijavanja** (t_{progr}) je odsječak vremena u kojem će unutrašnjost predmeta (jezgra, j) dostići temperaturu $\vartheta_{\text{peč}}$, odnosno, približno će dostići da je $\Delta T = T_r - T_j \approx 0$. Ove su razlike u temperaturama bitne jer o njima ovise vlastita naprezanja u materijalu (tzv. toplinske napetosti) poznate iz izraza:

$$\sigma_{\text{topl}} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

gdje je:

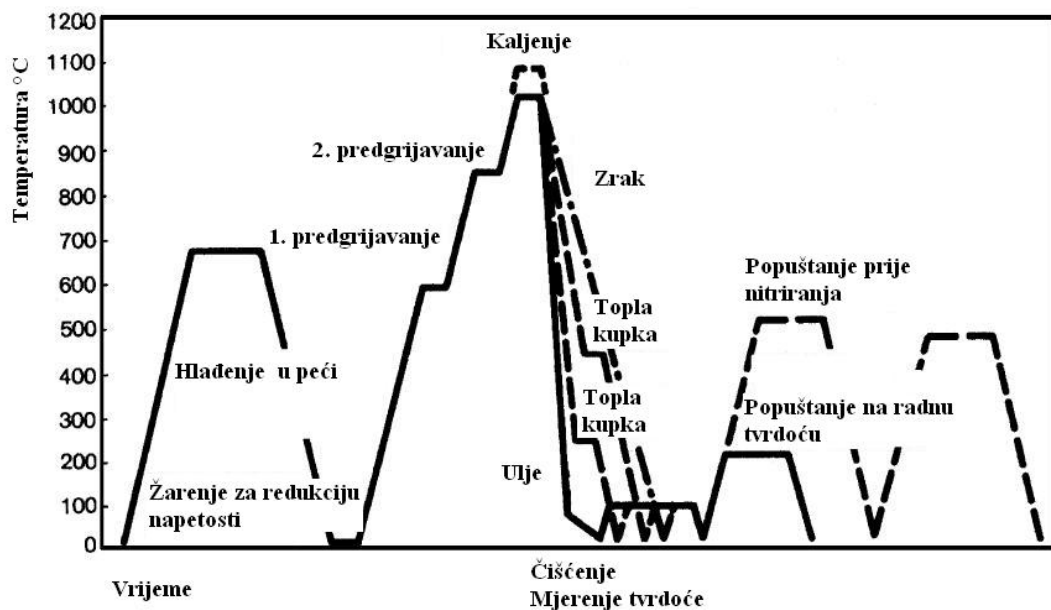
- | | | |
|--|---|--|
| σ_{topl} , N/mm ² | - | toplinsko naprezanje, |
| E , N/mm ² | - | modul elastičnosti grijanoga tijela, |
| α , mm/mmK | - | koeficijent toplinskog rastezanja tijela, |
| ΔT , K | - | temperaturna razlika ruba i jezgre predmeta. |

- **Vrijeme držanja** (t_d) je odsječak vremena potreban za željenu homogenizaciju strukture materijala (npr. otapanja karbida, nitrida, nečistoća). Ova temperatura ovisi o sastavu ohlađivane legure, temperaturi peći, sklonosti ka pogrubljenju zrna itd.

- **Vrijeme ohlađivanja** (t_{ohl}) ovisi o izabranom načinu hlađenja, a način hlađenja ovisi o vrsti legure (sastavu) i o željenoj strukturnoj promjeni.

Obzirom na točne zahtjeve na alat odlučeno je da će se alat napraviti u 2 primjerka od alatnog čelika za hladni rad K110 proizvođača Böhler, Austrija (X155 CrVMo 12 1 – Č4850) te od alatnog čelika K390 proizvedenog metalurgijom praha. Naime, ne smije se dogoditi da proizvodnja stane zbog bilo kojeg razloga, tako niti mogućeg oštećenja alata. Pošto alat ima i svoj rok trajanja, kada dođe do istrošenja alata i potrebe za brušenjem oštrice, potrebno je imati zamjenu. Zato će se prvo dati izraditi alat od jeftinijeg materijala (K 110) te će se na njemu (eventualno) uočiti mogućnosti za poboljšanje, te će se nakon toga dati izraditi provlakač od materijala K390 koji bi, prema predviđanju konstruktora alata, trebao imati rok trajanja oko 100 000 provlačenja.

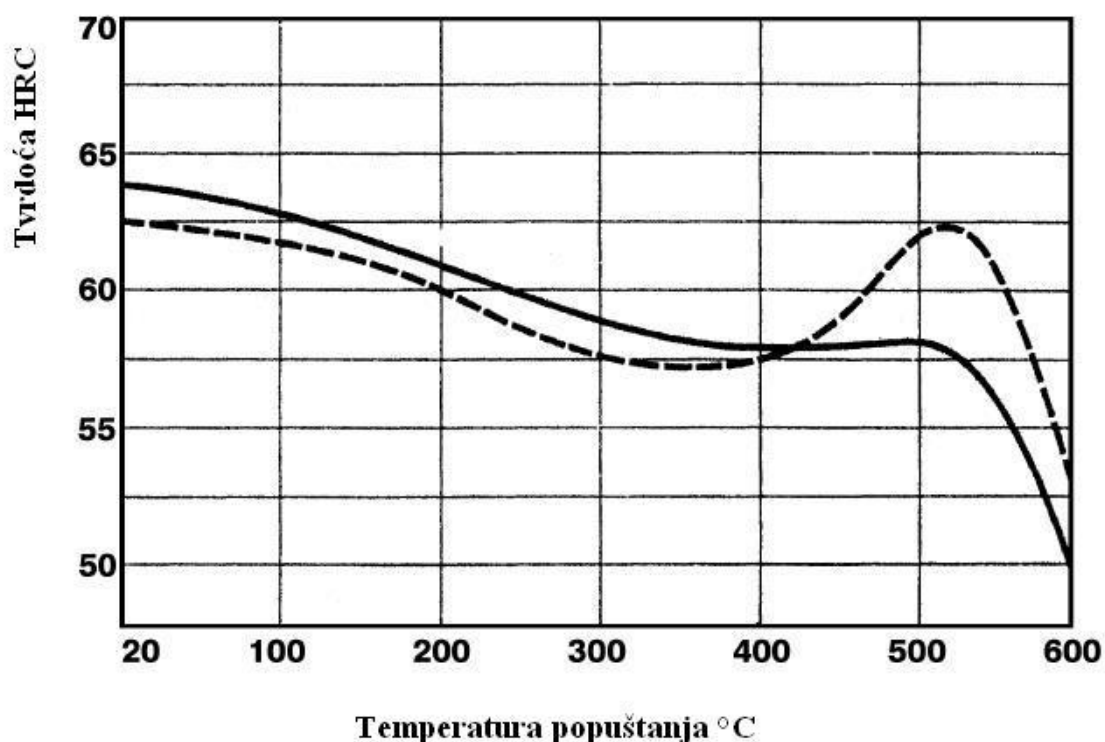
Na slici 17. prikazan je dijagram postupka toplinske obrade čelika K110 prema preporuci proizvođača materijala Böhler, Austria. Ukoliko se čelik K110 koristi u kaljenom i popuštenom stanju, onda se kali na temperaturama do 1100 °C. U slučaju naknadnog nitriranja, potrebno je popuštanje izvršiti u dva navrata. Prvi puta pri 520 °C, te drugo popuštanje izvršiti pri 30 – 50° nižoj temperaturi od prvog popuštanja, tj. na sekundarnu tvrdoću.



Slika 16. Dijagram toplinske obrade čelika K110 [8]

Također je provedeno popuštanje kontrolnog uzorka na temperaturu sekundarnog otvrdnjavanja tj. $\vartheta_{p1} = 520 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i $\vartheta_{p2} = 480 \text{ }^{\circ}\text{C}$ u trajanju od 2 sata, s ciljem naknadnog nitiranja u solnoj kupci postupkom TENIFER. Prilikom ovog postupka postignuta je tvrdoća 60 HRC (srednja vrijednost 5 mjerenja).

Na slici 17. je prikazan dijagram popuštanja čelika K110.



Slika 17. Dijagram popuštanja čelika K110 [8]

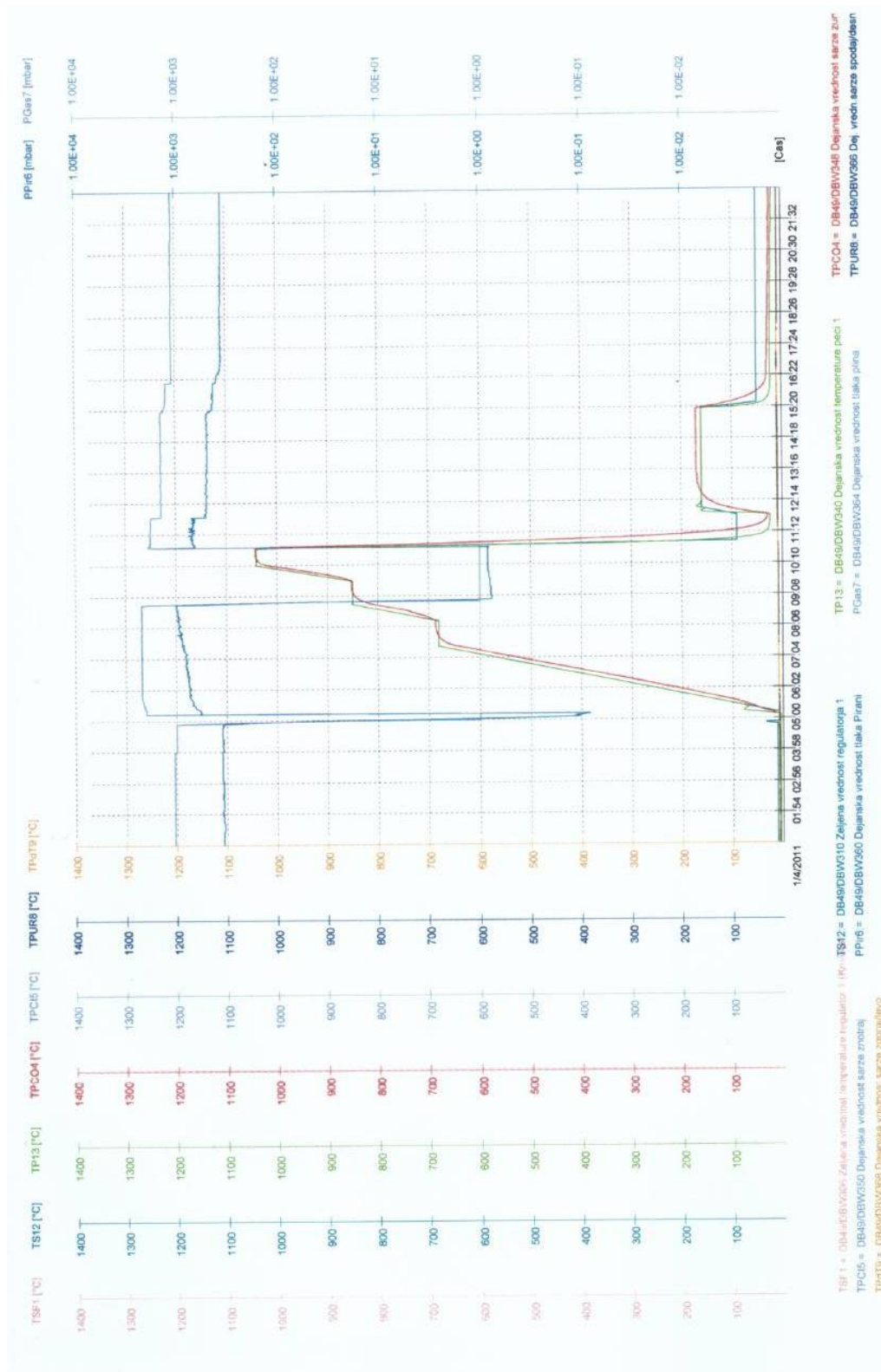
Za materijal K110 su odabrani slijedeći uvjeti toplinske obrade: Stupnjevano ugrijavanje do temperature austenitizacije prema dijagramu prikazanom na slici 16. Ugrijavanje kreće od sobne temperature do temperature 680 °C. Na 680 °C se zadržava 45 min radi progrijavanja, te se potom ugrijava do 850 °C gdje se opet čeka na progrijavanje do jezgre u trajanju od 45 min. Konačna temperatura austenitizacije je 1040 °C te se austenitizira u vremenu 35 min. Nakon gašenja je alat ponovno popušten na temperaturi od 180 °C u trajanju oko 3 h. Odabrano je niskotemperaturno popuštanje u cilju postizanja tvrdoće od 64 HRC – što je i postignuto. Cijeli postupak zakaljivanja i popuštanja šarže je trajao od 5:10 do 15:20. Dakle, približno 10 h. K110 (Č4850 – X 155 CrVMo 12 1) čelik zbog utjecaja legiranih

elemenata (V i Mo) može austenitizirati pri temperaturama čak do 1100 °C. Uobičajeno se popuštaju na temperaturama od 150 ... 250 °C, ali i na temperaturama 520 ... 580 °C što je rezultat sekundarnog otvrdnjavanja zbog izlučivanja karbida popuštanja V_4C_3 i Mo_2C u zaostalom austenitu koji će se pretvoriti u sekundarni martenzit (M'').

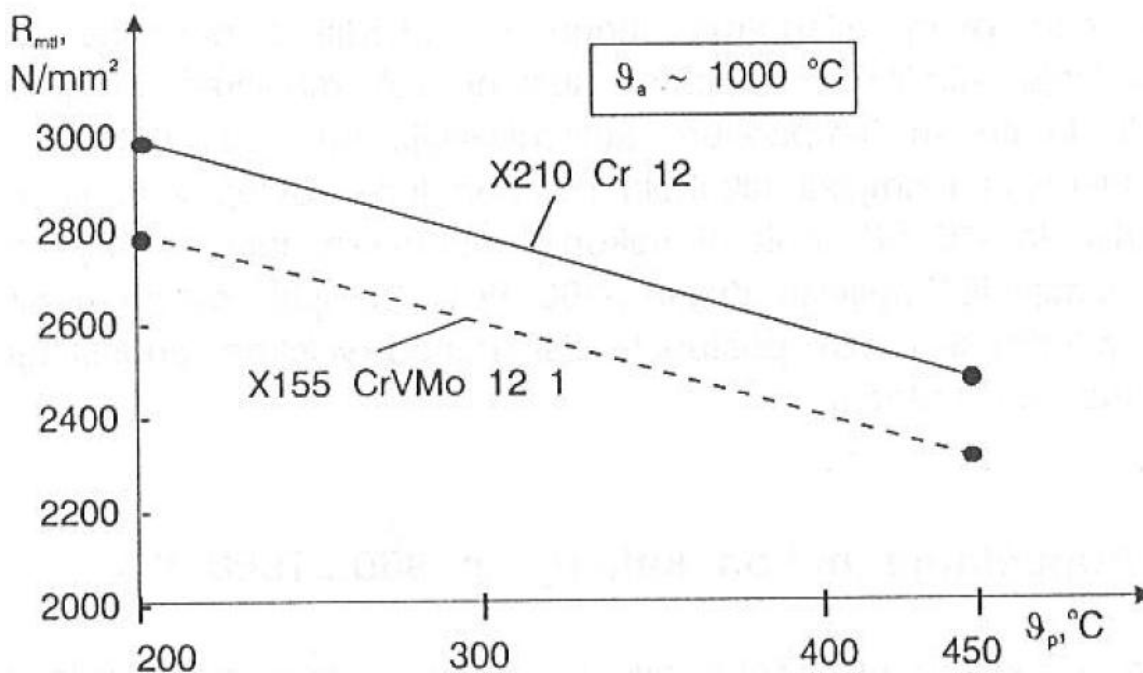
Nakon provedene toplinske obrade kaljenja i popuštanja postignuta je vrijednost tvrdoće 64 HRC (srednja vrijednost 5 mjerenja).



Slika 18. Fotografija i tehnički podaci vakuumske peći u kojoj je izvršena toplinska obradba alata [6]



Slika 19. Režim toplinske obrade alata od materijala K110



Slika 20. Utjecaj temperature popuštanja na tlačnu čvrstoću čelika s 12 %Cr

Svi čelici ove skupine kaljeni sa $\theta_a > 1040$ °C pokazuju pri temperaturama popuštanja θ_p 480 ... 560 °C veću ili manju pojavu sekundarne tvrdoće. Ta je pojava povezana sa dva fenomena:

- izlučivanjem karbida popuštanja (V_4C_3 , Mo_2C , W_2C)
- transformiranjem $Az \rightarrow M''$ pri hlađenju s temperature popuštanja

Karbid $(Cr, Fe)_7C_3$ nije djelotvoran jer pogrubljuje te se može zaključiti da je:

- kod X210 Cr 12 uzrok sekundarnom otvrdnuću transformacija $Az \rightarrow M''$,
- kod ostalih čelika su uzrok sekundarnog otvrdnuća oba fenomena.

Za praktično iskorištavanje sekundarne tvrdoće kod alatnih čelika za hladni rad u obzir dolazi isključivo alatni čelik K110 (Č4850 odnosno X155 CrVMo 12 1) jer zbog utjecaja V koji sprečava pogrubljenje austenitnog zrna se jedini može austenitizirati na temperaturama austenitizacije $\vartheta_a > 1040\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Upravo ove dvije činjenice omogućuju primjeni čelika K110 čak i za uobičajeni brzorezni rad. No, razliku od brzoreznih čelika čine idući parametri:

- moguća sekundarna tvrdoća mu je niža nego li je to uobičajeno za brzorezne čelike,
- za $\vartheta_p > 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tj. Za $P > 16500$) tvrdoća znatno brže pada nego li je to slučaj kod brzoreznih čelika.

5. Zaključak

U ovom diplomskom radu zadatak je bio izbor čelika za izradu provlakača pri proizvodnji generatora. U tijeku rada napravljeno je novo konstrukcijsko rješenje provlakača koje se sastoji u tome da je provlakač segmentiran. Time se postiže da je samo radni dio provlakača izrađen od alatnog čelika dok je vođenje alata izrađeno od čelika za poboljšavanje te nitrirano. U radu su navedene značajke raznih vrsta čelika za hladni rad koje dolaze u obzir za izradu provlakača. Kako je razred alatnih čelika za hladni rad jako širok, a Hrvatska je relativno malo tržište, zastupnici nude bitno sužen izbor materijala koji bi se mogli koristiti za izradu provlakača. U slučaju izrade provlakača cijena izrade samog alata bi se mogla okarakterizirati kao beznačajna u odnosu na ono što se tim alatom dobiva. Dakle, od alatnog čelika za hladni rad Č 4150 (K100), koji spada u lošije čelike za izradu ovog alata, ranije smo mogli bez istrošenja provlakača izvršiti do 2000 provlačenja. Iskustva s drugim provlakačima izrađenim od ovog čelika su takva da taj čelik Č 4150 (K100) u najboljem slučaju izdrži od 3000 do 4000 provlačenja. Kako je novo konstruirani alat bitno konstrukcijski promijenjen, išlo se na izradu alata prvo od čelika K110 koji se nakon provedene toplinske obrade kaljenja i popuštanja nalazi u radu duže od mjesec dana. Kod zadnjeg pregleda alata nisu uočena nikakva oštećenja. I konstrukcija i oštrina alata su se pokazali izuzetno dobrim. Sada je u fazi izrada istog alata od čelika K110 kojega ćemo također nitrirati tj. prethodno popustiti na sekundarnu tvrdoću prema preporuci proizvođača čelika a drugi provlakač izraditi od čelika K 390 koji je primjer vrhunca tehnologije proizvodnje čelika metalurgijom praha.

Popis literature

- [1]. Novosel, M., Cajner, F., Krumes, D., Alatni materijali, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1996 g.
- [2]. Oberg, E., Jones, Franklin, D., McCauley, Christopher J., Heald, Ricardo M., Machinery's Handbook (27th ed.), Industrial Press, (2004)
- [3]. <http://www.bohler-uddeholm.hr/boehler/441.php>
- [4]. Krumes, D., Toplinska obradba, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2000 g.
- [5]. Krumes, D., Površinske toplinske obradbe i inženjerstvo površina, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2004 g.
- [6]. <http://www.bohler-uddeholm.hr/boehler/2335.php>
- [7]. http://www.millerbroach.com/braoching_materials.html
- [8]. <http://www.bohler-uddeholm.hr/boehler/hrv/1197.php>

SADRŽAJ

1.	Uvod	1
2.	Čelici za izradu alata za provlačenje	4
3.	Alatni čelici.....	6
3.1.	Zahtjevi za alatne čelike i tražena svojstva.....	6
3.1.1.	Otpornost na trošenje	7
3.1.2.	Otpornost na popuštanje.....	8
3.2.	Razredi alatnih čelika.....	9
3.2.1.	W razred - otvrdnjavanje u vodi	11
3.2.2.	D razred alatnih čelika	18
4.	Eksperimentalni dio.....	27
4.1.	Izrada alata za provlačenje rotora generatora	27
4.2.	Toplinska obrada provlakača	36
5.	Zaključak.....	46

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela alatnih čelika [1].....	4
Slika 2. Osnovna krivulja popuštanja brzoreznih čelika [3]	8
Slika 3. Dijagram Fe-Fe ₃ C s ucrtanim područjem ugljičnih alatnih čelika (šrafirano)	14
Slika 4. Pojednostavnjeni pseudobinarni dijagram stanja Fe-Cr-C za 5 %Cr [1]	19
Slika 5. Pojednostavnjeni pseudobinarni dijagram stanja Fe-Cr-C za 12 %Cr [1]	19
Slika 6. Izotermički presjek stava Fe-Cr-C pri 20°C	20
Slika 7. Izotermički presjek stava Fe-Cr-C pri 1000°C [1]	20
Slika 8. Ovisnost veličine austenitnog zrna o temperaturi austenitizacije [1].....	25
Slika 9. Udjeli zaostalog austenita (Az) u čeliku X155 CrVMo 12 1 kaljenom s različitih temperatura [1]	26
Slika 10. Nacrt alata za provlačenje rotora generatora 225 snage od 53 kVA do 135 kVA	27
Slika 11. Ponuda za izradu provlakača.....	29
Slika 12. Usporedba svojstava alatnih čelika za hladni rad [8]	31
Slika 13. 100 t preša koja služi za uprešavanje vratila u rotore generatora	33
Slika 14. Provlakač rotora generatora 225 izrađen od materijala K110 (X 155 CrVMo 12 1)	35
Slika 15. Dijagram postupka toplinske obrade	36

Slika 16. Dijagram toplinske obrade čelika K110 [8].....	39
Slika 17. Dijagram popuštanja čelika K110 [8].....	40
Slika 18. Fotografija i tehnički podaci vakuumske peći u kojoj je izvršena toplinska obradba alata [6]	42
Slika 19. Režim toplinske obradbe alata od materijala K110	43
Slika 20. Utjecaj temperature popuštanja na tlačnu čvrstoću čelika s 12 %Cr.....	44

POPIS TABLICA

Tablica 1. AISI – SAE razredi [2]	10
Tablica 2. Nenormirana podjela nelegiranih alatnih čelika [1]	12
Tablica 3. Podjela ugljičnih čelika na kvalitetne skupine prema DIN-u [1].....	13
Tablica 4. Utjecaj lutajućih elemenata u jednom ugljičnom alatnom čeliku na D_1 i veličinu austenitnog zrna.....	17
Tablica 5. Utjecaj nekih legirajućih elemenata	17
Tablica 6. Kvantitativni pokazatelji različitih utjecaja na otpornost na trošenje visokolegiranih Cr – čelika [1]	22
Tablica 7. Primjeri tvrdoća određenih faza, karbida i termokemijskih slojeva [4, 5].....	24
Tablica 8. Cijene nekih vrsta čelika u Böhler Uddeholm	30

Osobito se zahvaljujem svom mentoru Prof. dr. sc. Božidaru Matijeviću na stručnoj pomoći, savjetima i strpljenju prilikom izrade ovoga rada. Zahvaljujem se svim profesorima i asistentima koji su doprinjeli uspješnom provođenju eksperimentalnih dijelova rada.

Veliko hvala i g. Eugenu Pužu koji mi je ustupio uzorke za ispitivanje i u mnogočemu pomogao u izradi alata i g. Mili Pašaliću iz firme Böhler Uddeholm na svakojakoj pomoći. Također hvala i kolegama i upravi na poslu koji su mi pomogli da rad privedem kraju, a posebna hvala g. Zlatku Šćulcu.

Zahvaljujem se i roditeljima i obitelji na potpori tijekom godina studiranja.

Prijateljima i kolegama sa fakulteta puno hvala na prijateljstvu i pomoći tokom studija.

Teško je zahvaljivati svakome poimence, stoga: „HVALA VAM SVIMA!“

Ovaj diplomski posvećujem „za Elizu“ i Karmen.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno uz konzultacije i korištenje navedene literature, te stečenog znanja tijekom studija i školovanja.

Željko Spajić

POPIS OZNAKA I KRATICA

Oznaka:	Naziv:	Mjerna jedinica
ϑ	Radna temperatura	$^{\circ}\text{C}$
M	Martenzit	
K	Karbid	
A_z	Zaustali austenit	
σ_{topl}	toplinsko naprezanje	N/mm ²
E	modul elastičnosti grijanoga tijela	N/mm ²
A	koeficijent toplinskog rastezanja tijela	mm/mmK
ΔT	temperaturna razlika ruba i jezgre predmeta	K
t_d	vrijeme držanja	s
t_{ugr}	vrijeme ugrijavanja	s
t_{progr}	vrijeme progrijavanja	s
t_{ohl}	vrijeme ohlađivanja	s
$\vartheta_{p1}, \vartheta_{p2}$	temperatura popuštanja	$^{\circ}\text{C}$